

Aplicación de Columnas de Módulo Controlado como Cimentación para Tanques en Zonas Sísmicas

Alfredo CIRION^{a,1} y Rémi CHATTE^b

^aEngineering Manager, Menard Mexico

^bGeneral Manager, Menard Mexico

Resumen. La ventaja de utilizar técnicas de mejoramiento de suelos como solución para cimentar estructuras que producen descargas uniformes (tanques, edificaciones, zonas de almacenamiento, etc.) en terrenos de baja capacidad de carga, es que se obtienen ahorros importantes en los costos globales de construcción, además de que se optimizan los plazos de ejecución, en comparación con soluciones tradicionales de cimentaciones profundas, como pueden ser pilotes o pilas, hincados o colocados en sitio. En nuestro país el uso de técnicas de mejoramiento de suelos ha cobrado auge en los últimos años debido a las experiencias exitosas de los casos construidos en el pasado, en los que este tipo de solución ha logrado responder a las necesidades de los proyectos, aún bajo condiciones sísmicas. Además, los avances en la ingeniería de análisis y cálculo de los mejoramientos propuestos, aunado a las experiencias adquiridas en proyectos clave, así como el desarrollo tecnológico que permite tener equipos de construcción cada vez más potentes y que alcanzan profundidades de tratamiento mayores sin decremento de los rendimientos de construcción, permite hacer cada vez más competitivas estas soluciones. Particular importancia tienen los proyectos que se desarrollan en lugares con actividad sísmica, pues ya sea que los mejoramientos de suelos tengan como objetivo principal el de mitigar los efectos que los sismos pueden producir en la infraestructura (compactación dinámica, vibro-compactación, etc.), o bien, que el mejoramiento por sí mismo sea capaz de responder adecuadamente a la acción sísmica y continúe desarrollando su función de capacidad de carga vertical (CMC, inclusiones, columnas de grava, etc.). El presente artículo ilustra una solución de cimentación con Columnas de Módulo Controlado, CMC, para tanques de almacenamiento construidos en terrenos arcillosos ubicados en una zona de gran actividad sísmica, como lo es la ciudad de Mexicali (Aceleración pico del terreno en superficie, P.G.A.= 0.428 g), la cual sustituyó a una solución de cimentación profunda tradicional con pilotes prefabricados. Se presentan la descripción de la alternativa de solución con CMC, se presentan los aspectos básicos del diseño ante sismo y se verifican los principales aspectos constructivos que redundaron en los beneficios económicos para el proyecto.

Palabras Clave. Aceleración Sísmica, asentamientos, capa de repartición, cimentaciones, columnas de módulo controlado, CMC, deformaciones verticales, inclusiones rígidas, mejoramiento de suelos, optimización, PGA, reforzamiento de suelos, tanques, sismo, suelo.

¹ Alfredo Cirión, Gerente de Ingeniería en Menard México, Mejoramiento de Suelos Menard México - Ciudad de México; E-mail: cirion.alfredo@menard.com.mx

1. Introducción

Las técnicas de mejoramiento de suelos ofrecen soluciones diversas que permiten transformar un terreno que originalmente tiene propiedades mecánicas pobres o deficientes, a otro con mayor portabilidad global y con menos capacidad de deformación, de tal manera que resulte en un suelo diferente (mejorado) que sea capaz de funcionar como soporte adecuado para edificaciones de diversos tipos. En otras palabras, un terreno tratado con alguna técnica de mejoramiento de suelo somero, o bien, de mediana o de gran profundidad terminará teniendo una mayor capacidad de carga y presentará asentamientos a corto, mediano y largo plazo controlados, cumpliendo con los criterios adecuados para el tipo de estructura que se construya en superficie.

Cuando el proyecto en construcción se encuentra en zona sísmica, el suelo estará sujeto a los efectos dinámicos que la energía sísmica produce, y la técnica de mejoramiento de suelos que se adopte deberá estar encaminada a disminuir o mitigar los efectos negativos que se generen, tal como licuación de arenas, deformaciones laterales excesivas, exceso de presiones verticales por volteo, etc.; pero también, el mejoramiento de suelo deberá estar diseñado y, constructivamente hablando, bien adaptado para poder resistir, sin mayores problemas, los efectos que la energía dinámica le demanda, sin sufrir daño en sí mismo.

Tal es el caso del mejoramiento de suelos con Columnas de Módulo Controlado que se aplica en suelos cohesivos blandos para el control de deformaciones verticales en terrenos que se encuentran en zonas sísmicas: generalmente este mejoramiento de suelos se concibe para rigidizar el terreno en el sentido vertical y controlar los asentamientos superficiales, pero durante la vida útil del proyecto, el mismo terreno podrá estar sujeto a acciones sísmicas que deberán tenerse en cuenta en el diseño del mismo mejoramiento. Si la energía sísmica es suficiente para generar grandes deformaciones en el terreno, a veces, será conveniente colocar refuerzo de acero en las CMC que ayuden a tomar los esfuerzos adicionales que se generan en ellas.

2. Mejoramiento de Suelos con Columnas de Módulo Controlado (CMC)

Las Columnas de Módulo Controlado (CMC) son elementos de mortero o concreto simple que se instalan masivamente en un terreno formado por estratos de suelo con bajas propiedades mecánicas, con el fin de reforzarlo con estos elementos verticales rígidos y mejorar, por ende, su comportamiento global: aumentar su capacidad de carga y disminuir asentamientos. La construcción de estas inclusiones rígidas se realiza empleando maquinaria de gran potencia – par rotor y fuerza vertical de empuje altos – con el fin de tener rendimientos de producción elevados que permitan tener una gran cantidad de elementos en tiempos relativamente cortos. La barrena de perforación utilizada por el equipo se conoce como ‘barrena de desplazamiento’ [1], pues su forma geométrica permite, durante su penetración en el terreno, desplazar lateralmente los suelos evitando así su extracción a la superficie, generando un mejoramiento lateral del suelo circundante a la CMC, teniendo mejores condiciones de fricción lateral debido al pasivo lateral generado, y evitando tener desperdicio de material de perforación importante en la superficie, lo que reduce en costos de acarreo prácticamente nulos y plataformas de trabajo limpias [2]. La barrena es posicionada sobre un punto fijado en superficie con topografía, según el arreglo en mallas regulares previsto, y se introduce

en el terreno hasta la profundidad de desplante definida en el diseño. Acto seguido, la barrena se comienza a extraer del terreno al mismo tiempo que el concreto o mortero se bombea a través de la misma barrena que tiene el interior hueco. El concreto premezclado, que llega en camiones, se vacía directamente en la bomba provista en campo. Debido a que la colocación del concreto se hace cuando la barrena está aún en el terreno, esta última sirve entonces como elemento de contención (ademe) de las paredes de la perforación, dejando el terreno confinado en todo momento hasta que toda la Columna queda rellena por concreto. Finalmente, cuando la barrena ha sido extraída completamente del terreno el equipo se mueve al punto topográfico contiguo para comenzar la ejecución de la CMC aledaña. Es en este momento en el que, si es necesario, se procede a la colocación de la armadura de acero de refuerzo en la CMC recién construida. La figura siguiente ilustra de forma sencilla la secuencia de ejecución de una CMC reforzada.

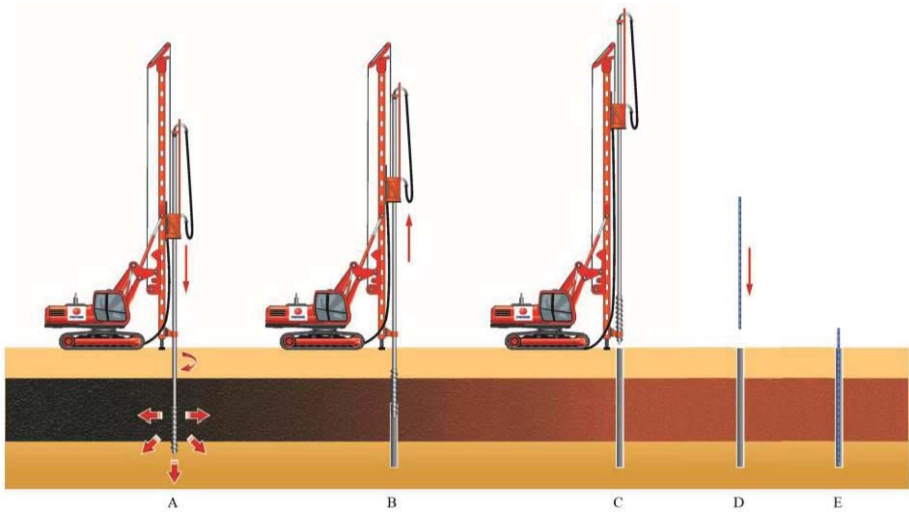


Figura 1. Secuencia constructiva general de una CMC reforzada. A) Perforación; B) Extracción de la barrena y colocación del concreto; C) Fin de colocación de concreto hasta la plataforma de trabajo; D) Instalación de armadura de acero de refuerzo E) Fin de construcción de CMC reforzada.

3. Solución de cimentación para tanques de almacenamiento mediante el mejoramiento de suelos con reforzamiento con Columnas de Módulo Controlado (CMC).

La solución tradicional para la cimentación de tanques de almacenamiento construidos en terrenos que no tienen la suficiente capacidad de carga para sostener el peso del líquido o material contenido suele ser la instalación de pilas o pilotes de cimentación profunda que están ligados estructuralmente a una losa de espesor importante instalada en la superficie. Sin embargo, esta solución no suele ser, en la mayoría de los casos, la solución más económicamente viable o que pueda construirse en tiempos cortos. Es por esto, que las técnicas de mejoramiento de suelos, que convierten un terreno blando, muy deformable, o con baja capacidad de carga, en terrenos competentes para soportar

estructuras pesadas, resultan soluciones técnicamente viables y, normalmente, más económicas.

Entre todas las soluciones de *mejoramiento de suelos* existentes, una que suele ser una alternativa atractiva para resolver el soporte de tanques pesados y/o de grandes dimensiones, y que elimina el uso de pilas o pilotes y de losas de concreto reforzado estructural de gran dimensión, es la instalación de *Columnas de Módulo Controlado*, pues esta técnica permite que la cimentación sea solamente superficial, que se construya de manera más sencilla y más económica, y que se lleve a cabo en menores tiempos de construcción [3]. Las *Columnas de Módulo Controlado* han sido ampliamente utilizadas como sistema de cimentación de tanques de almacenamiento puesto que se pueden aplicar en prácticamente todo tipo de suelos, la eficiencia en su proceso constructivo permite disminuir los tiempos de construcción de los tanques, se reemplaza la losa de cimentación superficial por un anillo de cimentación de concreto reforzado y un firme de concreto, o bien, una losa de espesor pequeño, lo cual redundará en menores costos globales de cimentación, y al final resultan en un sistema de mejoramiento de suelos que permite tener un suelo reforzado de tal modo que es capaz de tomar cargas de magnitud importante (cargas distribuidas desde 50 kPa hasta más de 700 kPa), acomodando asentamientos absolutos totales dentro de criterios admisibles (entre 2.0 cm y 30.0 cm) y reduciendo los asentamientos diferenciales bajo el tanque a valores prácticamente nulos (0.0005 a 0.008), según las necesidades de operación [4]. Además, esta solución de mejoramiento de suelos se adapta bien a todos los tipos de sismicidad, pudiendo tener terrenos reforzados con CMC hechas de concreto simple (sin acero de refuerzo) en zonas de poca o mediana sismicidad, pero también en zonas que sufren de aceleraciones sísmicas importantes ($a_0 > 0.35 g$), en donde las CMC se pueden completar con acero de refuerzo o fibras para concreto, como un medio para asegurar su continuidad vertical en toda la profundidad y/o le ayuden a tomar los esfuerzos que ocurren en las secciones de concreto de las CMC dadas las deformaciones laterales producidas por las ondas de cortante de origen sísmico ocurridos en los depósitos de suelo.

4. Bases de diseño de un sistema de mejoramiento de suelos con CMC para tanques construidos en zonas sísmicas.

La solución de mejoramiento de suelos con CMC adaptada a tomar las cargas verticales que provienen de la superestructura consiste en la instalación de un grupo de estos elementos rígidos distribuidos de forma regular en el terreno, con la longitud necesaria para atravesar los suelos blandos que se desean reforzar. Las Columnas generalmente se apoyan en un estrato firme y poco deformable (suelo competente) o directamente en roca, aunque puede haber también sistemas 'flotantes', en cuyo caso, el pie de las CMC quedan embebidas en un suelo blando o no tan competente, con el fin de aceptar cierta deformación vertical uniforme a largo plazo, que no tendrá mayores repercusiones en las condiciones de servicio del tanque [5]. Por otro lado, el sistema deberá contar con una capa de material granular compactado en la superficie que funcione como una capa de transición entre la cimentación superficial (zapata, losa de concreto o placa base de acero) y la cabeza de las CMC, que tiene como objetivo hacer que las cargas que provienen de la súper estructura pasen en un alto porcentaje directamente a las Columnas y que el terreno circundante a dichos elementos quede descargado lo más posible (ver figura 2). En la medida que esta capa sea eficiente en repartir las cargas, se

tendrán menos deformaciones verticales globales en superficie. A este respecto, la rigidez de esta capa juega un papel esencial en la eficiencia del funcionamiento del sistema, de modo que debe diseñarse adecuadamente. En ocasiones esta *capa de repartición* funciona en conjunto con la losa o zapata de cimentación, aportando cada elemento la parte de rigidez que se necesita para transmitir las cargas adecuadamente a las CMC.

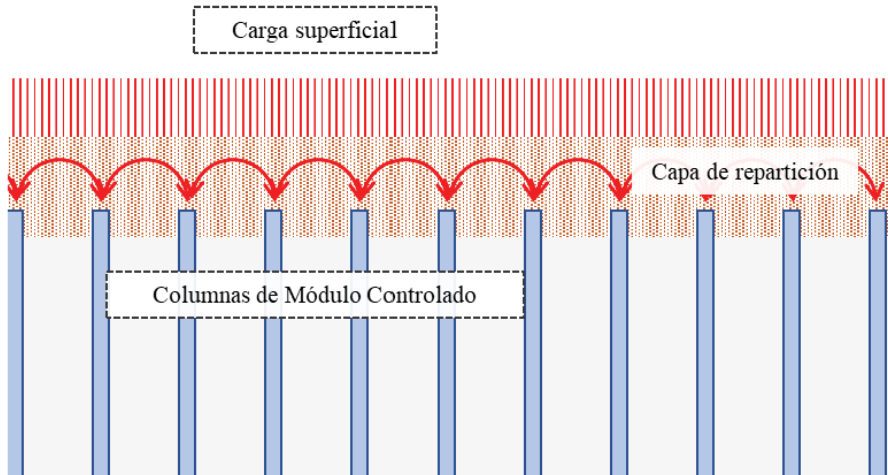


Figura 2. Sistema CMC – *Capa de repartición*. Las cargas verticales superficiales provenientes de la superestructura, se reparten uniformemente por *efecto de arco* hacia las cabezas de las CMC, a través de un estrato de suelo compactado diseñado con la rigidez suficiente para cumplir eficientemente con esta función.

Cuando se trata de tanques, la solución con CMC permite tener una losa superficial de cimentación colocada sobre la capa de repartición, aunque los casos más optimizados se resuelven con solo un relleno compactado -que hace las veces de capa de repartición-, sobre el que descansa una placa de acero estructural que constituye el fondo del tanque, y un anillo de cimentación perimetral (conocido en inglés como ring-wall o ring-beam) que contiene al relleno y sobre el cual se apoya la estructura del tanque. Esta última opción reemplaza totalmente las losas de concreto y evita ligas estructurales, resultando generalmente en la solución más optimizada en tiempos y costos de construcción. Ver figura 3.

Con esta configuración, el sistema con CMC no solo funciona para las condiciones descritas de carga vertical estática, sino que se acopla también a las deformaciones y cargas laterales producidas por la acción sísmica dinámica. Cuando se produce un sismo, el conjunto de CMC embebidas en el terreno se deforman horizontalmente conforme lo hace el suelo que las circunda, generando muy poca o nula oposición al movimiento de este último (ver figura 4), y al mismo tiempo, el relleno instalado en superficie acopla bien los desplazamientos del terreno con los movimientos horizontales producidos por las fuerzas inerciales que actúan en el tanque.

Por otro lado, se ha podido demostrar que la instalación de capas de suelo compactado en superficie, cambian favorablemente el comportamiento de los depósitos de suelo blandos sujetos a sismo [6].

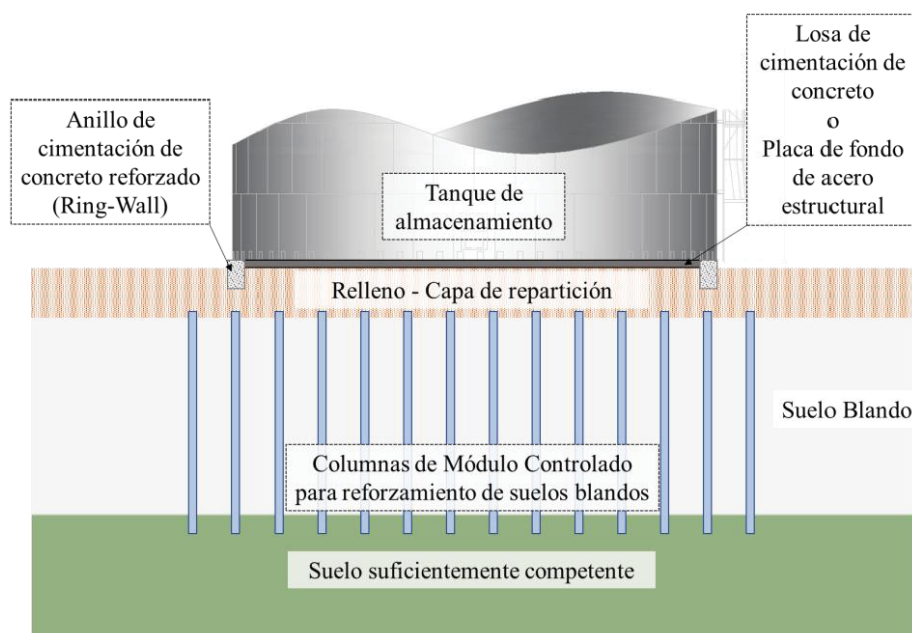


Figura 3. Esquema del sistema de reforzamiento de suelos blandos con CMC para soportar las cargas provenientes de Tanques de Almacenamiento: El sistema de mejoramiento de suelos blandos con CMC permite optimizar la cimentación del tanque a un relleno compactado (que cumple las funciones de la capa de repartición), un anillo de cimentación perimetral (ring-wall) que sostiene la estructura del tanque y una losa o placa de fondo que soporta el peso de los líquidos almacenados.

De este modo, se vuelve interesante analizar el comportamiento del conjunto de CMC colocadas en el terreno ante la acción accidental (sismo), estimar las deformaciones laterales producidas en estos elementos rígidos, y verificar que las inclusiones tienen un comportamiento que pueda considerarse correcto.

Con base en este análisis, que incluye la estimación de la rigidez lateral del depósito de suelo que se deforma con el sismo, la magnitud de este último, y el desplazamiento en superficie, es posible inferir la deformación del suelo y del conjunto de CMC incrustado en éste [7]. Sabiendo entonces la configuración de deformación de cada CMC, se pueden obtener los elementos mecánicos asociados a esa deformación, a partir de la rigidez de cada columna: Momento Flector, Fuerzas Cortantes, etc. De este análisis, conociendo los esfuerzos combinados de flexión y carga axial de las secciones de concreto en toda la longitud de las CMC, se puede determinar si existe o no la necesidad de colocación de algunas barras, o incluso jaulas completas de armado de acero refuerzo.

En zonas de alta intensidad sísmica, la deformación horizontal del suelo, y por ende de las CMC, puede llegar a ser de tal magnitud, que el resultado de este análisis arroje la necesidad ineludible de la colocación de acero de refuerzo. Un análisis estructural detallado define la cantidad, posición y longitud del armado requerido.

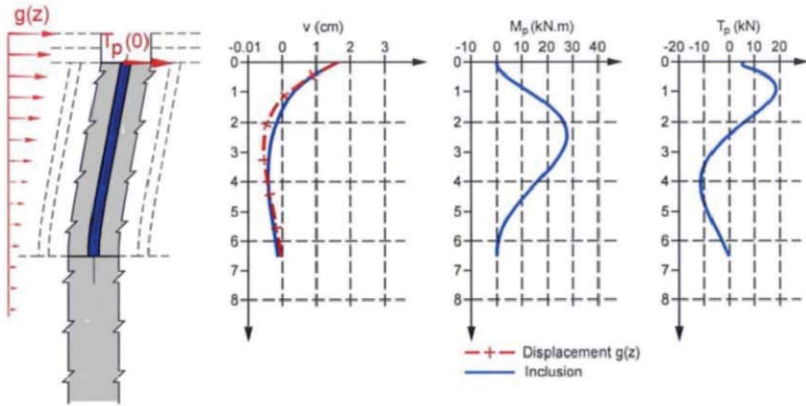


Figura 4. Representación de la etapa de cálculo de deformaciones y elementos mecánicos en inclusiones rígidas embebidas en un depósito de suelo sujetas a una carga sísmica horizontal².

5. Particularidades constructivas.

Las Columnas de Módulo Controlado son un método de mejoramiento de suelo que incluye la instalación masiva de elementos rígidos en el terreno con el fin de reforzarlo, como ya se ha comentado con anterioridad, por ello es importante utilizar equipos de construcción que aseguren un rendimiento importante para instalar la mayor cantidad de elementos en el menor tiempo. Para este proceso, se requiere que los equipos cuenten con un sistema electrónico de instrumentación, monitoreo y registro de los parámetros de construcción para poder obtener las fichas de construcción que sean evidencia de la calidad de la producción. En cuanto a la colocación del refuerzo adicional de acero, ésta se hace inmediatamente después de terminar el vaciado de concreto en cada CMC, deslizando fácilmente el conjunto de barras o jaulas previamente habilitadas mientras el concreto está fresco aún. Importante es considerar que deben de utilizarse también piezas añadidas en las jaulas de armado que aseguren la separación de barras y la ubicación de éstas dentro de la CMC, y que garanticen los espesores de recubrimiento necesarios. Si bien se necesita personal capacitado para el habilitado, armado y colocación del acero de refuerzo, así como cierta experiencia para este proceso, estas tareas son bastante más sencillas en comparación con las que tienen que realizarse para la construcción de elementos tradicionales de cimentación profunda como son pilas o pilotes. Por otro lado, la conexión estructural de las barras de acero de refuerzo de las CMC con las losas o zapatas no es necesaria en la mayoría de los casos.

6. Conclusiones

Las *Columnas de Módulo Controlado* es una técnica de *mejoramiento de suelos* que refuerza suelos blandos altamente deformables o con baja capacidad de carga con el fin de obtener un terreno combinado (suelo - CMC) mucho más competente y que es capaz de sostener cargas elevadas sin sufrir deformaciones importantes.

² B. Simon, M. Anic Antic, Projet National ASIRI, IREX, Presses des Ponts, 15 rue de la Fontaine au Roi 75127 Paris cedex 11; E-mail: contact@irex.asso.fr

Esta solución resulta más atractiva en términos económicos, de programa de obra y de calidad en la construcción, en comparación con soluciones tradicionales de cimentación profunda como pilas, pilotes, cajones y losas de cimentación. Esta solución con CMC tiene la gran ventaja de que es posible aplicarla en prácticamente todos los tipos de suelos blandos que existen, desde turbas o suelos orgánicos, hasta terrenos puramente granulares, pasando por suelos arcillosos, limosos, arenosos, o una combinación de todos ellos.

Particularmente las CMC se utilizan de forma recurrente como solución de cimentación para *tanques de almacenamiento* de agua o combustible, los cuales transmiten al terreno descargas de gran magnitud. Las CMC para tanques de almacenamiento se utilizan en conjunto con rellenos superficiales, losas de pequeño espesor, placas de fondo de acero, y/o anillos perimetrales de cimentación, evitando así el uso de losas de espesor importante y/o contratraves, eliminando la necesidad de realizar conexiones estructurales complicadas con elementos de cimentación profunda, y optimizando los tiempos y costos de ejecución.

Cuando los tanques se construyen en zonas sísmicas, el suelo reforzado con CMC ya no está solamente sometido a los esfuerzos verticales originados por las cargas del almacenamiento, sino que también se generan esfuerzos laterales debidos a los movimientos horizontales oscilatorios que el sismo produce. Si estos movimientos son de magnitud importante, las CMC son complementadas con acero de refuerzo con el fin de ayudar a tomar los esfuerzos adicionales que se inducen en las secciones de concreto. Este acero de refuerzo se coloca de manera simple dentro de cada columna construida y sin detrimento de los rendimientos de construcción, además de que las ligas estructurales con las losas o anillos de cimentación siguen sin ser indispensables en la gran mayoría de los casos.

El suelo reforzado con CMC armadas, se convierte entonces en una de las soluciones más atractivas de mejoramiento de suelos para tanques de almacenamiento construidos en zonas de alta sismicidad, debido a que resultan en una solución altamente económica, de altos rendimientos de construcción y con comprobada factibilidad técnica.

Referencias

- [1] Cirión A., Chatte R., Racinais J., Paulín J., Construcción de inclusiones rígidas de desplazamiento tipo Columnas de Módulo Controlado (CMC), XXVI RNIG – SMIG, Cancún, Q Roo, México, 2012
- [2] Cirión A., Paulín J., Racinais J., Glandy M., *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, volume3*, Displacement rigid inclusions, Paris France, 2013
- [3] Martínez J.C., Cirión A., Mejoramiento de suelos mediante inclusiones rígidas de desplazamiento como solución para el acondicionamiento de sitio para la construcción de las plantas duba en la refinería Francisco I. Madero, XXVIII RNIG - SMIG, Mérida, Yucatán, México, 2016
- [4] Colas F., Cirión A., Optimización de cimentaciones profundas para tanques de almacenamiento mediante la realización de un mejoramiento de suelos con inclusiones rígidas, XXVIII RNIG - SMIG, Mérida, Yucatán, México, 2016
- [5] Auvinet, G., *Rigid inclusions in difficult soft soil conditions*, Rigid inclusions in Mexico City soft soils: history and perspectives, ISSMGE TC36, II UNAM, SMMS, Mexico City, 2006
- [6] Mayoral J.M., Romo M.P., Paulín J., Cirión A., *Rigid inclusions in difficult soft soil conditions*, Effect of layered clay deposits on the seismic behaviour of a single rigid inclusion, ISSMGE TC36, II UNAM, SMMS, Mexico City, 2006
- [7] B. Simon, *Projet National ASIRI – Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales*, IREX, Presses des Ponts, 15 rue de la Fontaine au Roi 75127 Paris cedex 1